

Resumen del proyecto

“Coupled Thermal and Mechanical 3D Finite Element Analysis for Pendulum and Speed Stroke Grinding Processes”

Realizado, presentado y calificado en la Universidad RWTH, Aachen Septiembre 2013

Realizado por:	Alberto Peña Baeza
Universidad destino:	RWTH Aachen
Universidad de origen:	Carlos III de Madrid
Titulación:	Ingeniería Industrial
Tutor universidad destino:	Michael Duscha
Tutor universidad origen:	Ana Muñoz

Leganés, 7 de Septiembre de 2014

Índice

1	Resumen	3
2	Introducción y objetivos	3
3	Estado del arte	4
3.1	Parámetros	6
3.2	Pulido de alta velocidad	6
3.3	Modelo de Elementos Finitos	7
3.3.1	Modelos térmicos	8
3.3.2	Modelos mecánicos	9
3.3.3	Modelos mixtos	10
3.4	Longitud de contacto	11
4	Modelado y simulación del proceso de pulido	12
4.1	Modelo de Elementos Finitos	12
4.1.1	Propiedades del material	12
4.1.2	Mallado y condiciones de contorno	13
5	Resultados y conclusiones	14
5.1	Análisis térmico	14
5.2	Análisis mecánico	18
5.3	Análisis modelo mixto	19
5.4	Conclusiones y trabajo futuro	21
6	Bibliografía	23

1 Resumen

En este documento se presenta un modelo térmico y mecánico de un proceso de pulido. Este modelo se ha desarrollado con la idea de poder ser utilizado como base para futuros estudios en los que se pretende determinar las tensiones residuales a las que se ve sometido una pieza después del proceso de pulido.

2 Introducción y objetivos

Existen muchos tipos de procesos de fabricación en la industria del metal. Dichos procesos requieren altas cantidades de energía que se transforma en distintas formas, como puede ser eliminación del material o pérdidas en forma de calor. De todos los tipos de procesos este proyecto fin de carrera se centra en pulido. El pulido es un proceso de gran importancia debido a que supone el 25% de todos los procesos de fabricación. Se usa en todo el mundo para procesos de acabado, como pueden ser dar la forma o tamaño requerido de un modo más preciso que con otros procesos convencionales como pueden ser el torneado o fresado. Por lo que el objetivo al emplear un proceso como el pulido es ser capaces de producir un producto de la más alta calidad en el menor tiempo posible y todo lo energéticamente eficiente como sea posible.

Como se ha comentado y se explicará más adelante, el objetivo del proceso de pulido es la obtención de un producto de alta calidad en cuanto a acabado superficial, precisión dimensional y propiedades tanto mecánicas como térmicas en un proceso lo más eficiente posible. Para ser capaces de comprender la influencia de las condiciones del proceso es necesario tener una visión general de la historia de tensiones y temperaturas. Por este motivo, el análisis numérico y simulaciones son necesarios. Sin embargo, las investigaciones hasta ahora se centran en parámetros que por sí solos no pueden explicar con exactitud el proceso y su impacto en la pieza mecanizada. Una limitación que se encuentra en simulaciones del Método de Elementos Finitos es que los modelos estaban modelados en 2D. Con lo cual, merece la pena desarrollar modelos 3D, los cuales nos permitirán obtener resultados más precisos del proceso de pulido.

Por lo que el objetivo principal de este Proyecto Fin de Carrera es desarrollar un modelo mixto fiable que determine la distribución de la temperatura en la superficie y capas superficiales de la pieza mecanizada cuando ésta es sometida a altas velocidades de trabajo. Este modelo debe servir de base para futuras investigaciones de cambios de fase y tensiones residuales de las primeras capas superficiales de la pieza mecanizada. Los distintos objetivos intermedios para obtener la meta final son:

1. Investigación de los procesos de pulido: modelos térmicos y sus efectos, aproximaciones de la longitud y superficie de contacto, modelado de cargas mecánicas...
2. Creación modelos de elementos finitos en 3D con propiedades del material dependientes de la temperatura para distintos procesos de pulido.
3. Determinar los distintos efectos producidos por distintos perfiles de fuente de calor en la pieza mecanizada.
4. Desarrollo de un modelo mixto de elementos finitos en 3D con una carga mecánica obtenida experimentalmente.
5. Estudiar las tensiones producidas en la pieza.
6. Debate sobre las mejores condiciones en el proceso de pulido.

Estos objetivos se han cumplido mediante el modelado de elementos finitos en 3D utilizando el software ABAQUS/Standard. El comportamiento del material y los perfiles utilizados en las cargas han sido definidos mediante dos subrutinas: DFLUX y DLOAD.

3 Estado del arte

Comparado con otros procesos de fabricación, el pulido es un proceso que utiliza gran cantidad de energía. En el proceso de pulido se utilizan materiales abrasivos, o granos, de múltiples aristas cortantes para retirar de forma continua y a altas velocidades material no deseado. Durante el proceso, la superficie abrasiva de la muela es presionada contra la superficie de la pieza a mecanizar y mediante el movimiento relativo de ambas superficies los granos van retirando material gradualmente. Se pueden establecer cinco elementos que se encuentran presentes en el proceso:

- La pieza a mecanizar: material, forma, propiedades mecánicas y químicas...
- Herramienta abrasiva: estructura, tamaño del grano, velocidad y material.
- Cinemática: geometría y comportamiento del contacto entre superficies.
- Refrigerante: propiedades físicas y térmicas, caudal.
- Alrededores.

Pueden distinguirse distintos procesos de pulido, como puede verse en la **Tabla 1**, lo más comunes están encuadrados. En esta tesis nos centramos en los procesos planos.

		Cylindrical grinding		Surface grinding	
		external	internal	surface	rotation
Peripheral grinding	peripheral plunge grinding				
	peripheral traverse grinding				
Side grinding	side plunge grinding				
	side traverse grinding				

Tabla 1: Resumen de los procesos de pulido [KLOC09; p.180]

La eliminación de material se produce por la acción simultánea del corte debido a los granos y al movimiento de la pieza al avanzar, en algunos casos también influye el posicionamiento vertical (profundidad) de la muela que influye en el espesor de la capa de material que se elimina, aunque normalmente este posicionamiento es gradual.

Durante el proceso de pulido se alcanzan altas temperaturas y se aplican altas presiones. La importancia de estudiar los efectos de la temperatura y presiones radica en entender el proceso al completo y evitar efectos térmicos negativos como pueden ser quemaduras o cambios de fase y por lo tanto tensiones residuales que pueden verse incrementadas debido a las cargas mecánicas.

Para entender el proceso hay que considerar que la eliminación de material se produce en tres fases:

- Deformación elástica
- Deformación elástica y plástica
- Deformación elástica, plástica y formación de viruta

En la primera fase se produce el primer contacto entre el grano y la pieza. A continuación durante la segunda fase el material es desplazado lateralmente y a pesar de que aparecen abultamientos en la superficie, todavía no se produce corte que dará lugar a la formación de la viruta. La tercera fase se produce cuando las fuerzas tangenciales y normales son suficientemente altas para que comience a formarse viruta. En la **Figura 1** pueden verse las distintas fases.

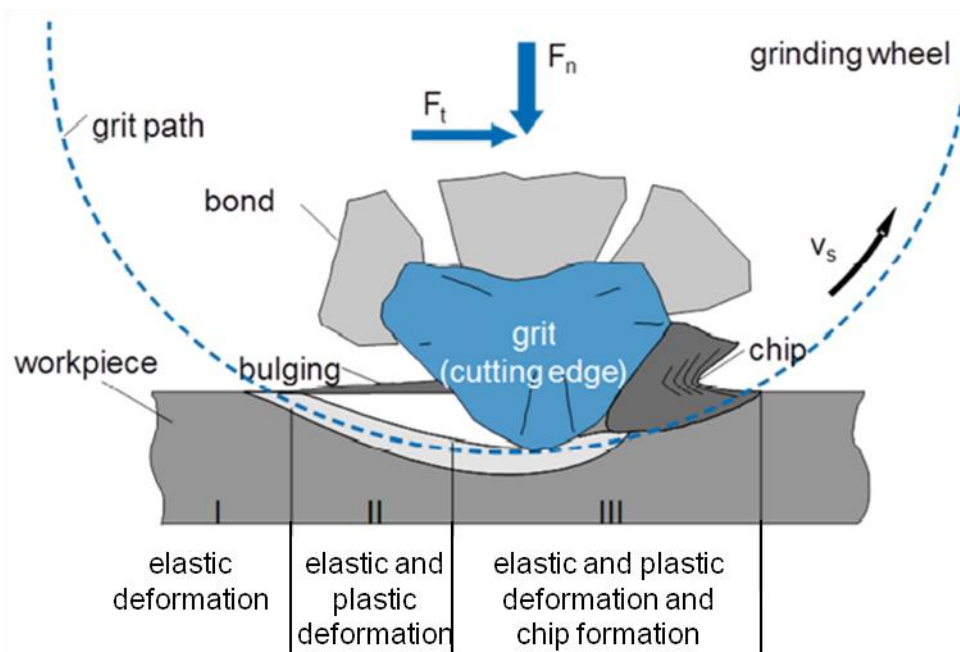


Figura 1: Fases de la acción del grano [KLOC05; p.9]

3.1 Parámetros

A continuación se introducen los principales parámetros del proceso:

- Velocidad específica de eliminación del material, Q'_w

Se utiliza para poder comparar procesos con diferentes parámetros y establecer su productividad. Viene referida a la superficie de contacto como se muestra a continuación:

$$Q'_w = a_e \cdot v_w \quad \text{Ecuación 1}$$

- Material eliminado, V_w

Se calcula en función del diámetro inicial d_{wA} y final d_{wE} .

$$V_w = \frac{\pi}{4} (d_{wA}^2 - d_{wE}^2) \quad \text{Ecuación 2}$$

Como ocurre con Q'_w el material eliminado depende también de la anchura de la muela, b_{eff} . Por lo que para evitar esa dependencia se utiliza su valor específico:

$$V'_w = \frac{V_w}{b_{seff}} \quad \text{Ecuación 3}$$

- Velocidad de corte, v_c

Como velocidad de corte se utiliza la suma de la velocidad de la mesa de trabajo (avance) v_w , y la velocidad angular de la muela en su periferia, v_s .

$$v_c = v_s \pm v_w \quad \text{Ecuación 4}$$

3.2 Pulido de alta velocidad

Nuevas tecnologías de pulido han permitido incrementar el número de aplicaciones de mecanizado de alto rendimiento, lo que permite incrementar calidad y productividad. Un ejemplo es el pulido de alta velocidad, con velocidades de la muela mayores que $v_s = 60$ m/s.

Se cree que el incremento de velocidad de la muela reducirá el calor transferido a la pieza. Sin embargo tiene que considerarse que el incremento de la velocidad de corte supone un incremento de la potencia consumida y por lo tanto de la energía transferida al sistema. Esto a su vez producirá un incremento de la temperatura en la zona de pulido por lo que es más probable producir daño térmico en el material. Para evitar estos posibles problemas se utiliza el pulido pendular. Con esta nueva tecnología se pretende aumentar las velocidades de trabajo mientras se mantiene constante el ratio de eliminación de material.

La idea está basada en el hecho de que al estar menos tiempo en contacto la herramienta y la pieza debido a altas velocidades de la mesa de trabajo, $v_w=200$ m/min, las temperaturas que se alcanzarán serán menores también. El objetivo de reducir la temperatura superficial radica en reducir las tensiones residuales, posibles cambios de fase y daño térmico. En la **Figura 2** pueden observarse la temperatura y distribución de energía para distintas velocidades de la mesa de trabajo. Se demostró que la temperatura superficial decrecía con el incremento de la velocidad de trabajo.

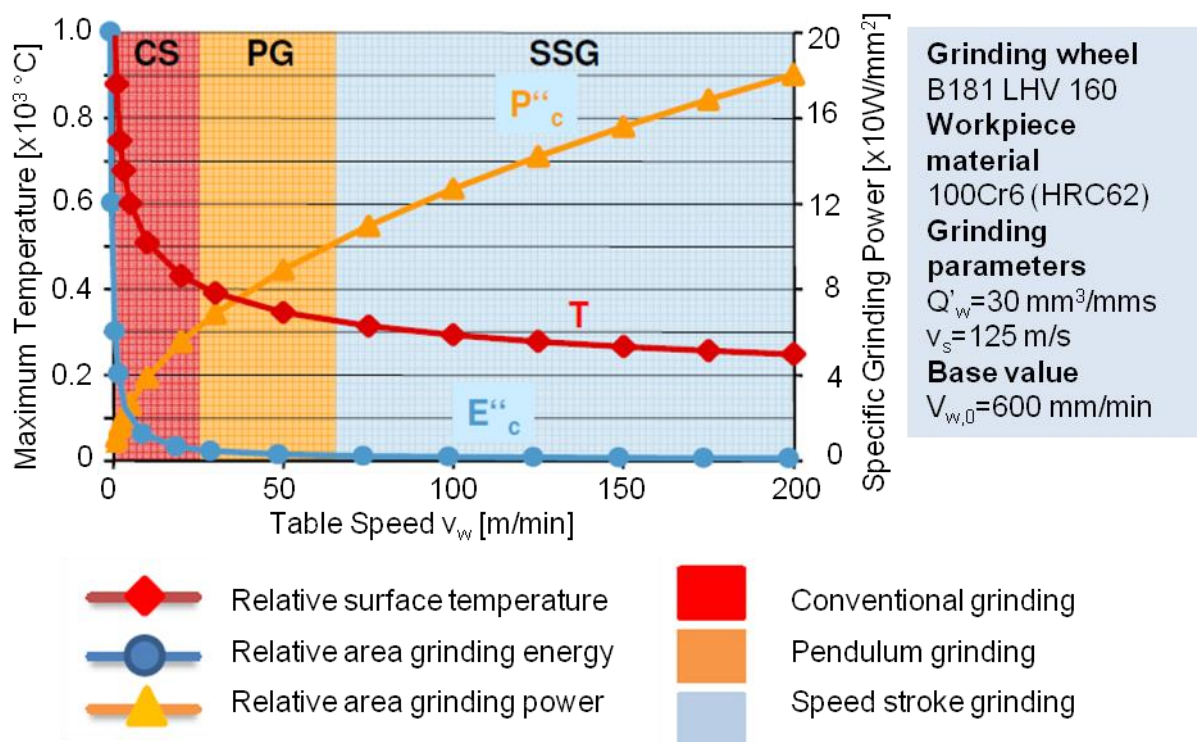


Figura 2: Distribuciones de temperatura y energía [DUSC10b; p146]

3.3 Modelo de Elementos Finitos

Uno de los problemas cuando se trata de determinar la temperatura durante el proceso de pulido es la capacidad de modelizar y posteriormente analizar el proceso debido a los innumerables parámetros que dependen de la temperatura así como determinadas propiedades del material que también dependen de la temperatura.

Inicialmente sólo había dos formas de evaluar o predecir las temperaturas máximas alcanzadas durante los diferentes procesos de mecanizado: analítica o experimentalmente. Sin embargo la evolución de las matemáticas y métodos de cálculo permiten resolver estos procesos de manera numérica. Para ello se emplea el Método de Elementos Finitos, que permiten resolver un gran número de procesos físicos. Mediante este método numérico el proceso se transforma en elementos más pequeños unidos por nodos y resuelto el conjunto mediante ecuaciones diferenciales a partir de las relaciones lineales de los nodos. Como se ha mencionado previamente para poder obtener un resultado realista, es necesario considerar el proceso en su totalidad conociendo las propiedades del refrigerante, propiedades térmicas y mecánicas del material a mecanizar, cargas aplicadas, etc.

3.3.1 Modelos térmicos

A lo largo de los años, diferentes perfiles de temperatura se han considerado dependiendo de las herramientas disponibles. Sin embargo la mayoría de los estudios realizados se han basado en el trabajo de C. Jaeger [JAEG42], en el cual se considera que el material está sometido a una fuente de calor constante y uniforme en movimiento.

No solo hay que considerar la fuente de calor sino cómo éste se distribuye a través de la pieza. Jaeger establece que hay dos posibles soluciones, una rectangular (uniforme) y otra triangular. Sin embargo investigaciones más recientes consideran una distribución cuadrática, que es algo más precisa pero requiere bastante más cálculo. En la **Figura 3** pueden verse las diferentes distribuciones con relación a la longitud de contacto. La longitud de contacto es un parámetro importante debido a su influencia en la transferencia de calor a la pieza.

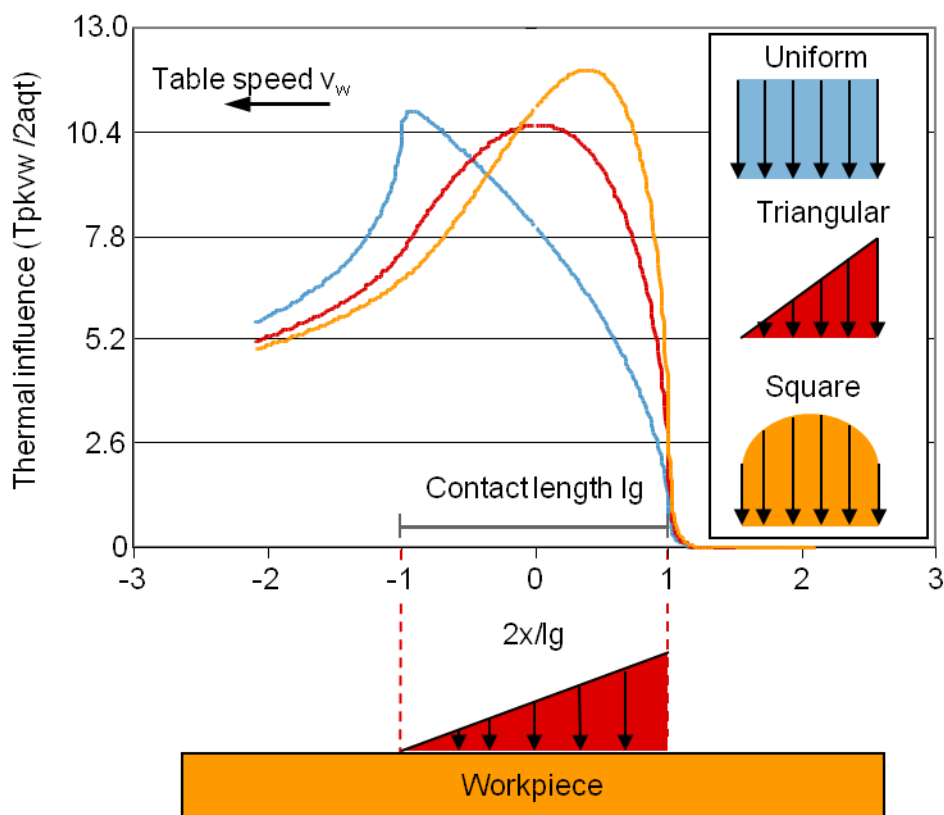


Figura 3: Diferentes aproximaciones al perfil de la fuente de calor

Un resumen de las distintas aproximaciones realizadas por distintos investigadores puede verse en la siguiente **Tabla 2**, habiendo sido actualizada a partir del trabajo de Doman [DOMA09;p.111]. Donde se consideran modelos de fuente de calor rectangular (\square), triangular (Δ) o compleja (\cap). Las condiciones de contorno consideradas intentan representar el modelo de la forma más realista posible: convección a través de la superficie superior (\uparrow) o convección a través de las paredes laterales (\leftrightarrow).

Modelo	Año	Tipo	Dimensión	Material	Condiciones de contorno	Comprobación experimental
MAHDI y ZHANG [ZHAN95a; pp.313-320]	1995	T	2D	E	Δ, \uparrow	
PAUL y CHATTOPADHYAY [PAUL95; pp.109-117]	1995	T	2D	TP	\square, \uparrow	✓
BIERMANN y SCHNEIDER [BIER97; pp.173-183]	1997	T	2D	E	$\square, \uparrow, \leftrightarrow$	✓
WEBER [WEBE99]	1999	T	3D	E	$\square, \uparrow, \leftrightarrow$	
JIN y STEPHENSON [JIN03,06]	1999	T	3D	E	$\Delta, \uparrow, \leftrightarrow$	
MAMALIS et al. [MAMA03; pp.929-934]	2003	T	2D	E	\square, \uparrow	
WANG et al. [WANG03; pp.953-959]	2003	T	3D	E	\square, \uparrow	✓
ANDERSON [ANDE08; pp.269-278]	2008	T	2D	E	$\square, \Delta, \uparrow, \leftrightarrow$	✓

Tabla 2: Diferentes aproximaciones para la simulación de temperatura [DOMA09; p.111]

3.3.2 Modelos mecánicos

Todos los modelos anteriores solo consideraban el análisis térmico, sin embargo en los procesos de mecanizado es importante estudiar la influencia de las cargas mecánicas. En la **Tabla 3** se muestran diferentes modelos mecánicos. Siendo (\cup) carga y desplazamientos nodales y (\oplus) la propia muela la que aplica la carga.

Modelo	Año	Tipo	Dimensión	Material	Conditcones de contorno	Comprobación experimental
WARNECKE y BARTH [WARN99]	1999	S	2D	E	\oplus	✓
KIM et al. [KIMP00; pp.2016-2035]	2000	S	2D	E	\oplus	
LIU et al. [LIUW02; pp.2-9]	2002	S	3D	E	\cup	

Tabla 3: Diferentes aproximaciones de modelos mecánicos [DOMA09; p.111]

3.3.3 Modelos mixtos

Sin embargo como ya se ha mencionado anteriormente, el proceso de pulido no solo consta de cargas mecánicas o térmicas sino una combinación de ambas. Por ese motivo la muela se modela como una carga normal de presión y una carga tangencial, además de incluir una fuente de calor que se mueve a lo largo de la pieza con una velocidad v_w . En la siguiente tabla se muestran las distintas investigaciones con modelos mixtos. Siendo (\Downarrow) cuando la carga se aplica como presión normal y (\Rightarrow) en el caso de que sea tensión tangencial.

Modelo	Año	Tipo	Dimensión	Material	Condiciones de contorno	Comprobación experimental
MAHDI	1998	TS	2D	TP	Δ, \uparrow	
[MAHD98; pp.23-33] YU y LAU	1999	TS	2D	TP	$\square, \Downarrow, \Rightarrow, \uparrow$	\checkmark
[YUXX99; pp.13-22] MAHDI and ZHANG	2000	TS	2D	TP	$\Delta, \Downarrow, \Rightarrow, \uparrow$	
[ZHAN95b; pp.148-156] MOULIK et al.	2001	TS	2D	TP	$\square, \Delta, \uparrow$	
[MOUL01; pp.831-851] HAMDI et al.	2004	TS	2D	TP	Δ, \uparrow	
[HAMD04; pp.277-285] SHAH	2011	TS	2D	TP	$\cap, \uparrow, \leftrightarrow$	
[SHAH11; p.38]						

Tabla 4: Diferentes aproximaciones al modelo mixto [DOMA09; p.111]

En las investigaciones más avanzadas se utilizan tanto perfiles triangulares como cuadráticos para el modelado de la temperatura mientras que el perfil de las cargas mecánicas suele considerarse triangular. La posición de los valores máximos coinciden en ambos como puede verse en la **Figura 4**.

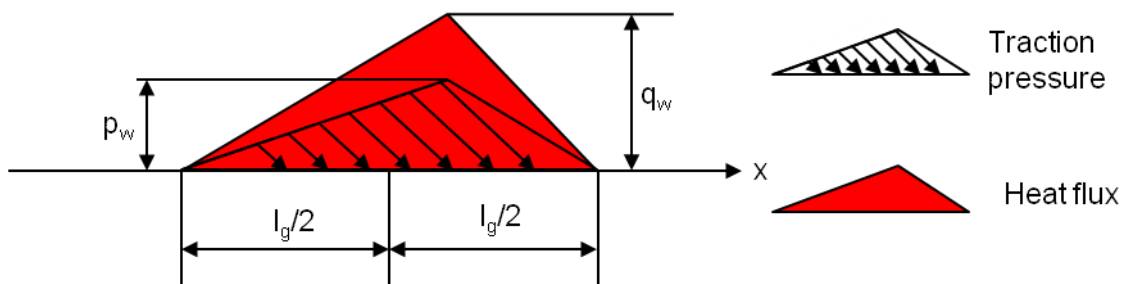


Figura 4: Aproximaciones de temperatura y presión por MAHDI [MAHD98; pp.19-21]

3.4 Longitud de contacto

Como se apuntó anteriormente, la longitud o superficie de contacto es un parámetro interesante que ha de tenerse en cuenta debido a su influencia en los resultados a obtener. Debe considerarse que cuando dos superficies están en contacto, muela y pieza a mecanizar, no son completamente lisas, cada una tiene una topografía determinada y además se deforman debido a las fuerzas presentes en el proceso de mecanizado.

Diferentes aproximaciones se han estudiado. Qi et al. [QIHS97; p.4] desarrollaron un modelo, **Ecuación 5**, donde los principales parámetros que influyen en la longitud de contacto son la profundidad de corte, a_e , la deformación elástica de la rueda y su topografía.

$$l_{cr} = [R_r^2 \cdot 8F'_n (K_s + K_w) d_e] + l_g^2 \quad \text{Ecuación 5}$$

donde,

$$K_s = \frac{1 - \nu_s^2}{\pi E_s} \quad K_w = \frac{1 - \nu_w^2}{\pi E_w}$$

$$l_g = (a_e d_e)^{0.5} \quad \frac{1}{d_e} = \frac{1}{d_s} \pm \frac{1}{d_w}$$

Para poder aplicar esta expresión se necesita calcular el valor de rugosidad experimentalmente, sus valores varían [11-15] para pulido sin lubricante y [22-27] para pulido con lubricante.

El segundo modelo considerado fue utilizado por ANDERSON [ANDE08; pp.269-278] pero desarrollado por MARINESCU et al. [MARIN04; pp.93-106]. En este modelo se tienen en cuenta los contactos mecánicos y la cinemática del proceso de pulido. El primer término de la ecuación corresponde a la deformación en la zona de contacto y el segundo a la longitud de contacto geométrica.

$$l_{cr} = \sqrt{\frac{8R_r^2 P d_s}{\pi \mu E^* \nu_s b_w} + a_e d_s} \quad \text{Ecuación 6}$$

donde

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_w^2}{E_w} + \frac{1 - \nu_s^2}{E_s}$$

De acuerdo a diversos investigadores como POMBO et al. [POMB12; pp.90-91], la expresión de MARINESCU es una buena aproximación a considerar porque provee con una buena correlación con los resultados experimentales.

Una aproximación sencilla y válida para estudios preliminares es considerar la longitud de contacto como dos veces la longitud de contacto geométrica para altas profundidades de corte o tres veces la longitud de contacto geométrica para profundidades de corte pequeñas. Como puede verse en los estudios de MAO et al. [MAOC08] y confirmados por BABEL et al. [BABE13; p.98] que pueden verse en la **Figura 5**.

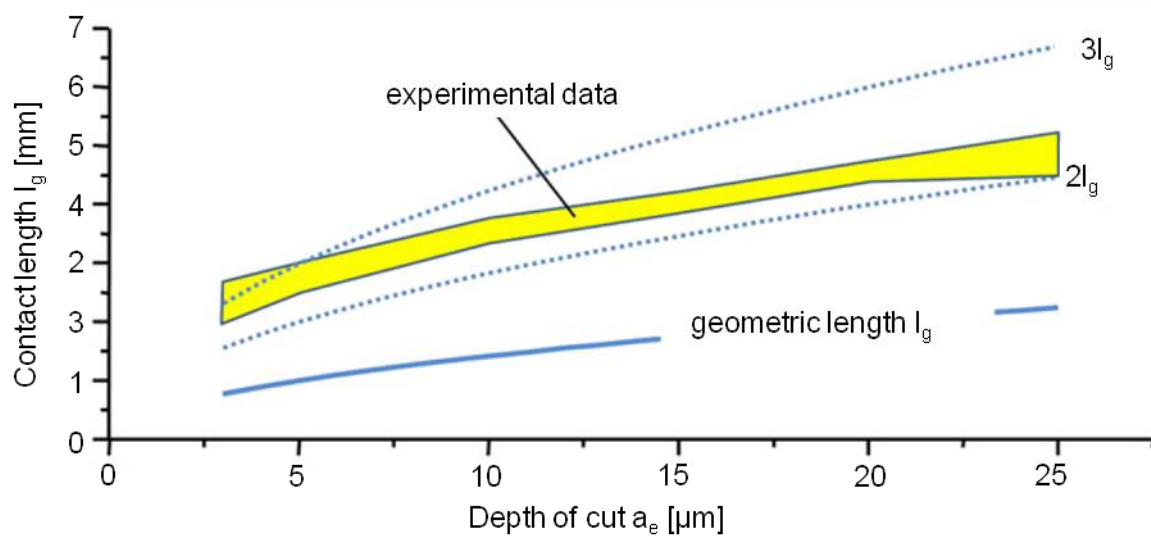


Figura 5: Diferentes aproximaciones a la longitud de contacto por BABEL et al. [BABE13; p.98]

4 Modelado y simulación del proceso de pulido

Para el modelado en 3D mediante elementos finitos se ha utilizado el software ABAQUS/Standard. Dicho software muestra su potencial y conveniencia de uso debido a la posibilidad de implementación de subrutinas programadas en FORTRAN. Las subrutinas necesarias para la simulación del proceso son DFLUX para la fuente de calor y DLOAD para las cargas mecánicas, otras subrutinas muy útiles para estudios futuros son UMAT y UEXPAN para la definición del comportamiento de las propiedades del material y para el coeficiente de expansión respectivamente.

4.1 Modelo de Elementos Finitos

4.1.1 Propiedades del material

El material utilizado para la pieza a mecanizar es AISI52100 (100Cr6), un acero endurecido al carbono. Dicho acero puede encontrarse en aplicaciones de la industria del automóvil (ejes, rodamientos,...) debido a sus buenas propiedades anti corrosión y fatiga.

Se considera que las propiedades son dependientes de la temperatura para poder simular el proceso según ocurre en la vida real y poder obtener unos resultados fiables. Dichas propiedades se muestran en la **Tabla 5**.

Temp	Conductividad	Calor específico	Coefficiente de expansión	Densidad	Módulo de Young
$\Theta [^{\circ}\text{C}]$	$\lambda [\text{W/m}\cdot\text{K}]$	$c_{pm} [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$	$\alpha_m \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$	$\rho [\text{kg/m}^3]$	$E \cdot 10^5 [\text{MPa}]$
20	35.62	477.63	10.23	7791.8	2.13E+05
100	39.05	491.46	10.72	7766.7	2.07E+05
200	39.36	505.12	11.54	7737.8	2.02E+05
300	37.76	525.46	12.11	7706.8	1.95E+05
400	35.4	550.14	12.64	7673.6	1.87E+05
500	32.87	577.4	13.20	7638.0	1.77E+05
600	30.25	606.85	13.68	7600.0	1.63E+05
700	27.69	638.22	14.21	7559.3	1.45E+05
800	23.28	700.02	15.42	7503.4	1.25E+05
900	26.26	697.50	16.76	7439.2	9.98E+04
1000	28.25	695.00	17.96	7371.9	8.17E+04
1100	29.84	692.50	19.06	7301.7	6.69E+04
1200	31.46	690.01	20.97	7228.7	5.48E+04

Tabla 5: Propiedades dependientes de la temperatura

4.1.2 Mallado y condiciones de contorno

Por lo general la densidad del mallado depende de las cargas a aplicar y de las condiciones de contorno consideradas. Como el proceso de pulido produce altos gradientes de temperatura en la zona de mecanizado y capas adyacentes, es necesario una malla muy fina en dichas zonas incrementando su tamaño son la profundidad de la pieza.

La importancia de la elección de las condiciones de contorno radica en la necesidad de reproducir el proceso con exactitud. Al hacer las consideraciones oportunas habrá más posibilidades de obtener resultados precisos. En la **Figura 6** pueden verse tanto el mallado como las condiciones de contorno.

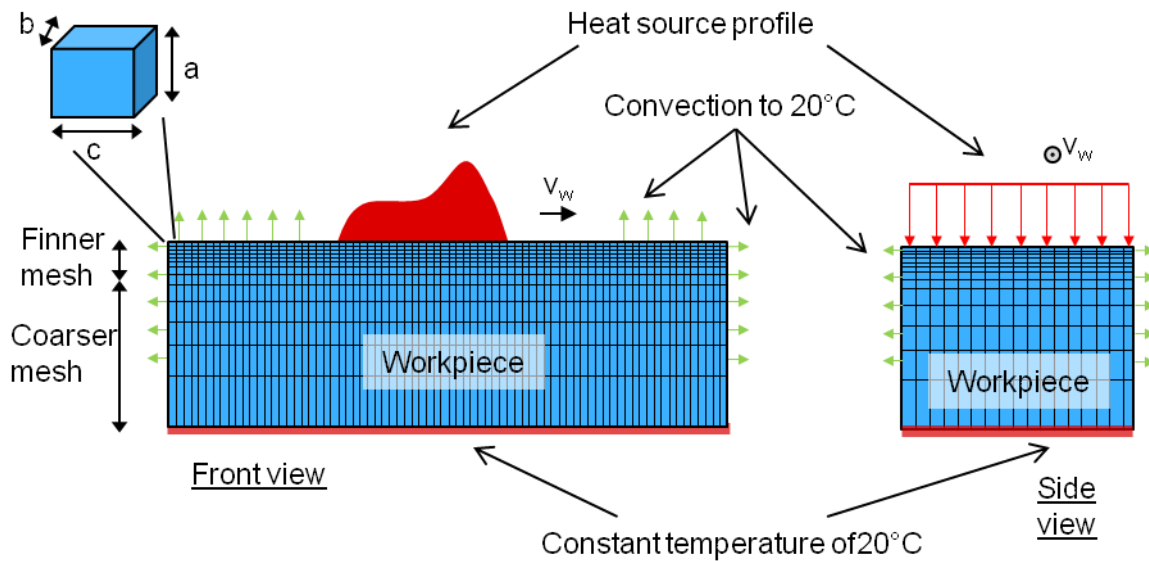


Figura 6: Condiciones de contorno térmicas

La temperatura del ambiente se supone 20°C, así como la temperatura inicial de la pieza. Una vez comienza el proceso se mantiene la temperatura de la base a 20°C porque se considera un cuerpo infinito. Se considerará convección a través de las paredes laterales así como la superficie mecanizada. Como condiciones de contorno mecánicas se determina que las paredes y base están fijas.

5 Resultados y conclusiones

En este capítulo se introducen los resultados de los distintos modelos en 3D estudiados. Primero se presentan los resultados del modelo térmico, a continuación los del modelo mecánico para finalizar con los del modelo mixto.

Por último se presentarán las conclusiones y posibles ideas para trabajos futuros.

5.1 Análisis térmico

El primer paso consistía en encontrar el tamaño adecuado de la malla para obtener unos resultados fiables y precisos pero que no incrementasen innecesariamente el tiempo de cálculo. Los tres modelos estudiados contenían 26000, 16000 y 58500 elementos del tipo DC3D8, se puede ver en la **Figura 7** que la variación en cuanto a temperatura máxima no varía significativamente, $\Delta T = \pm 3^\circ\text{C}$, sin embargo, la forma sí que se ve modificada.

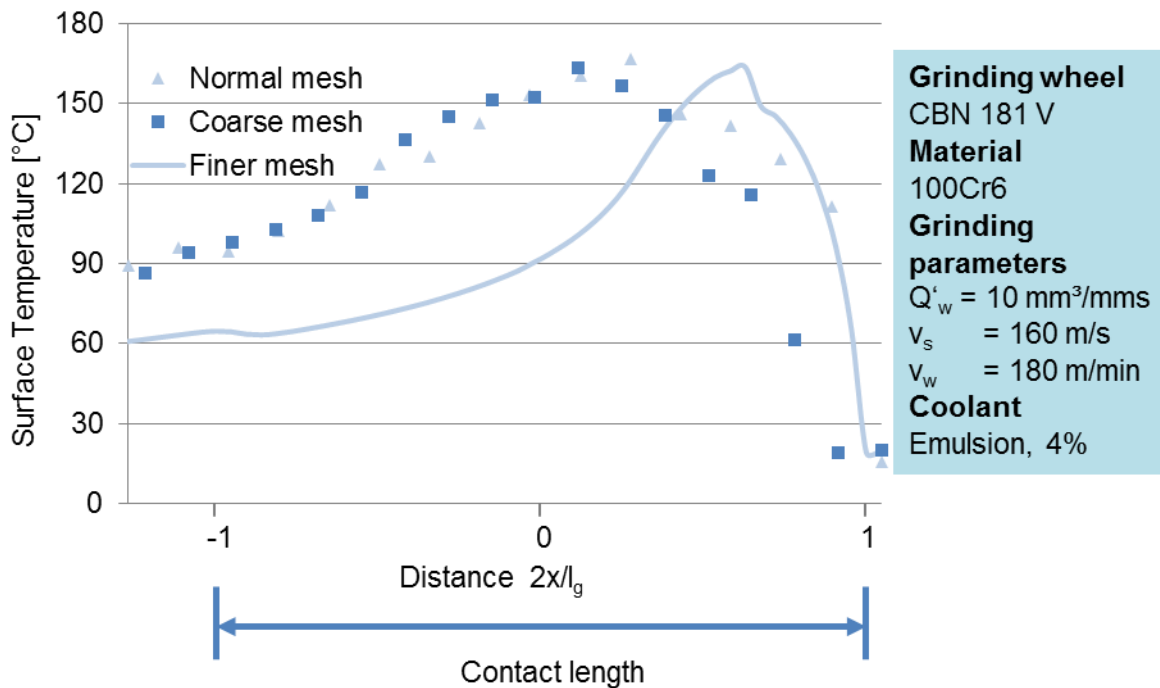


Figura 7: Comparación de la temperatura superficial en función del número de elementos

No solo el tamaño de la malla influye en la precisión de la simulación, hay que tener en cuenta también los incrementos de tiempo utilizados. Si éstos son muy grandes o muy pequeños puede darse el caso de que no se den las condiciones necesarias para que la simulación comience y nos de error, como puede verse en la siguiente figura.

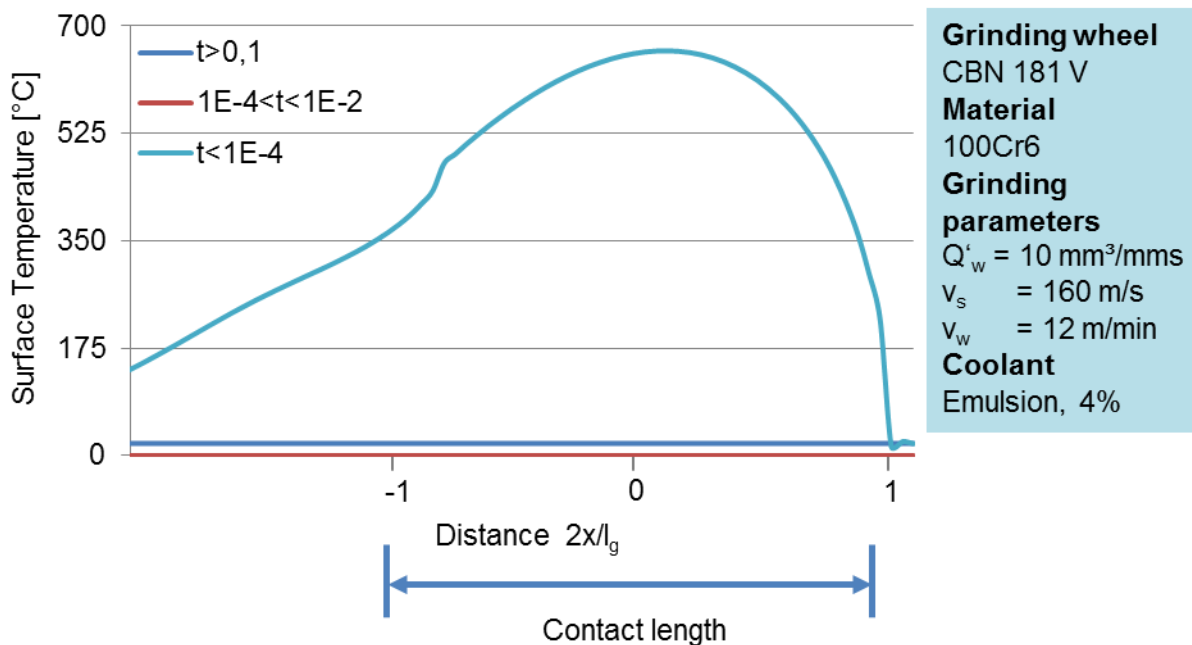


Figura 8: Incrementos de tiempo y su efecto

El último parámetro considerado que podía afectar a los resultados era el máximo incremento de temperatura permitido en cada paso de la simulación. Se llegó a la conclusión de que un incremento entre 5°C y 100°C producía resultados aceptables.

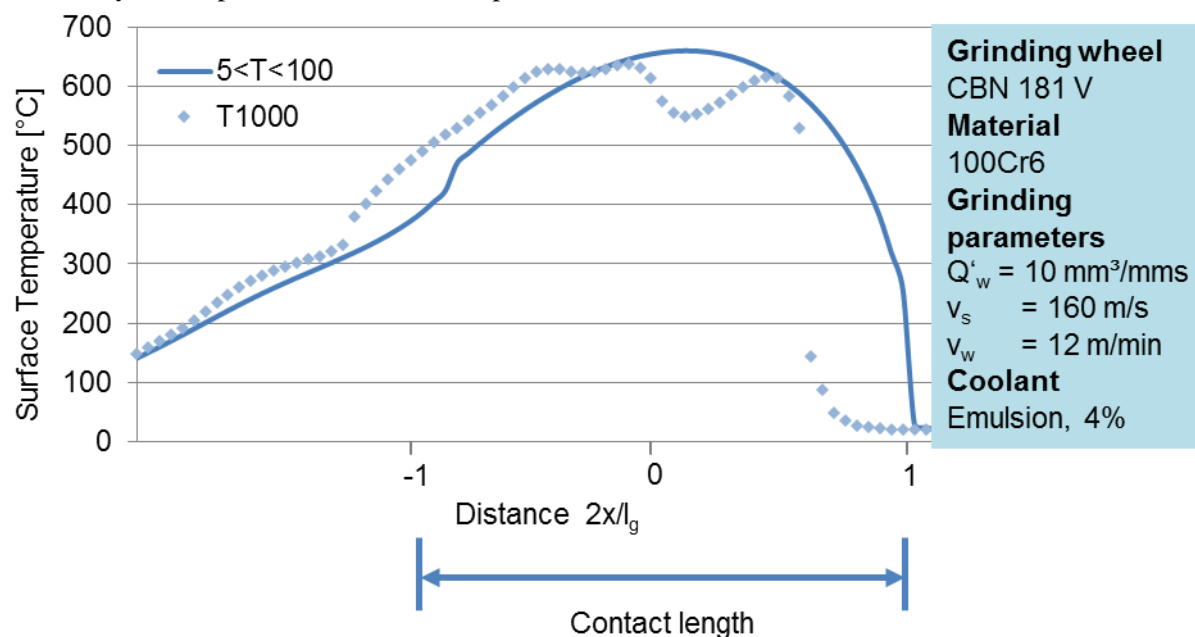


Figura 9: Comparación de los resultados en función del incremento máximo de temperatura

Durante el análisis térmico las simulaciones se centran en las primeras capas de la superficie. En la **Figura 10** puede verse la evolución de la temperatura en función de la profundidad de la pieza.

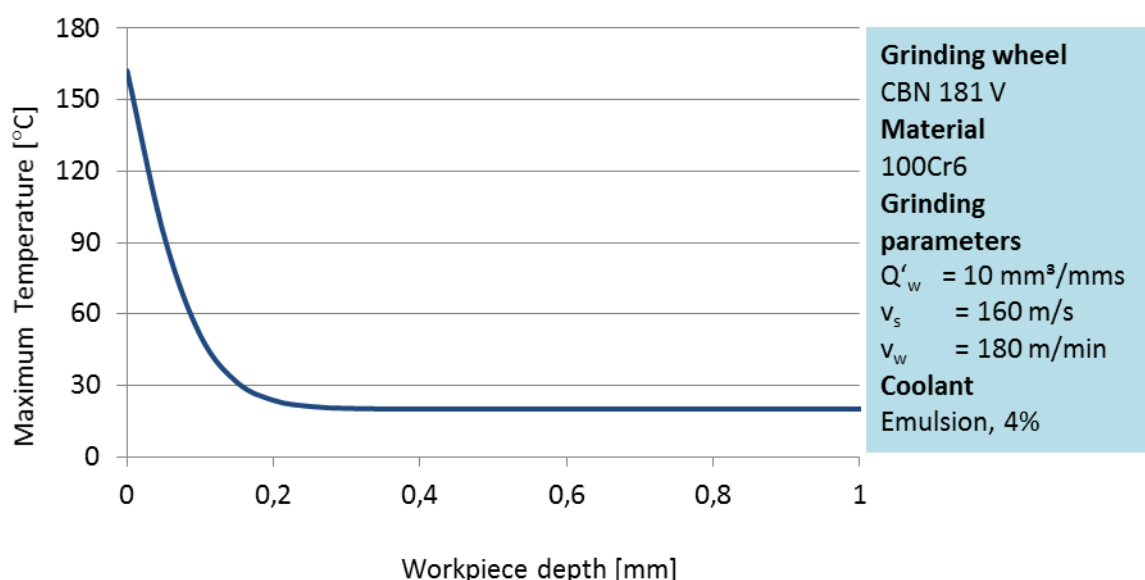


Figura 10: Evolución de la temperatura con la profundidad de la pieza

En capítulos previos se ha establecido que la velocidad de la mesa de trabajo es un parámetro que tiene una influencia importante en las temperaturas alcanzadas. En la siguiente figura puede verse que como se dijo anteriormente, para velocidades de alrededor de $v_w=200$ m/min la temperatura alcanzada es muy inferior a la alcanzada a otras velocidades más comunes para este tipo de procesos.

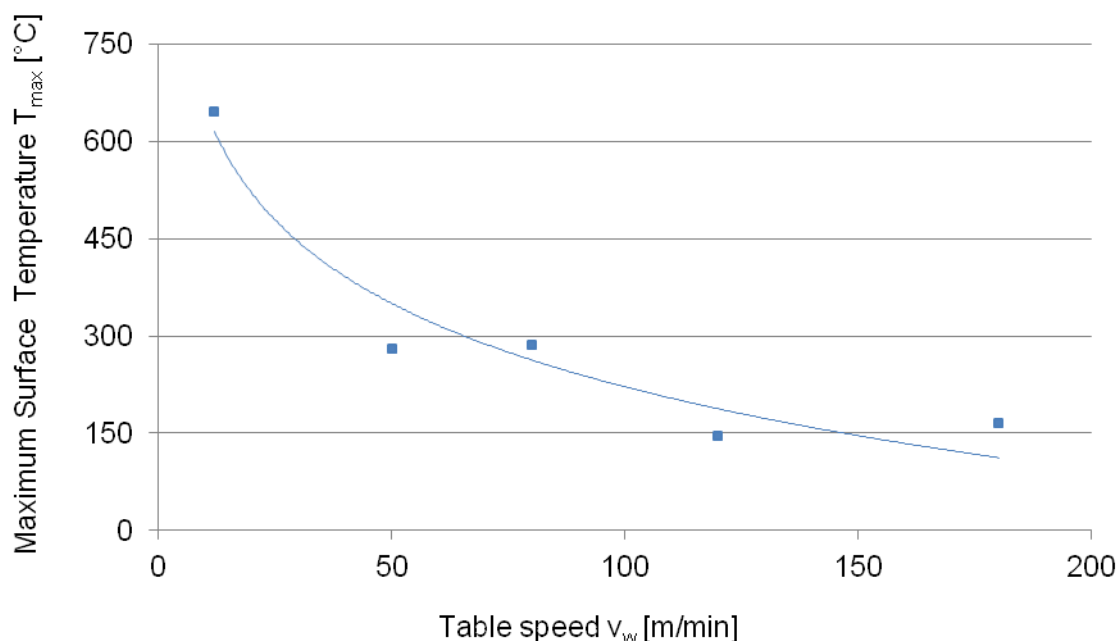


Figura 11: Dependencia de la temperatura con la velocidad de la mesa de trabajo

La velocidad de la mesa de trabajo no es el único parámetro que se ha variado en las simulaciones. En la **Tabla 6** pueden verse todos los parámetros modificados y la relación con otros parámetros importantes.

v_w [m/min]	v_s [m/s]	a_e [μ m]	Q'_w [mm ³ /mms]	F'_t [N/mm]	Tiempo de simulación [s]
12	160	0.050	10	2.64	1.20
50	160	0.012	10	1.66	0.30
80	160	0.008	10	1.37	0.20
120	160	0.005	10	1.81	0.15
180	160	0.003	10	0.49	0.10

Tabla 6: Diferentes parámetros utilizados en las simulaciones

En el capítulo del estado del arte se mencionaban los distintos tipos de perfil de temperatura que podían utilizarse para modelizar el proceso de pulido. En la **Figura 12** se muestra una comparación entre un perfil triangular y uno complejo para una $v_w=12$ m/min y puede verse una variación de temperatura de $\Delta T = 83$ °C. Por lo que se puede establecer que para bajas velocidades de trabajo el perfil a utilizar tiene gran influencia en los resultados.

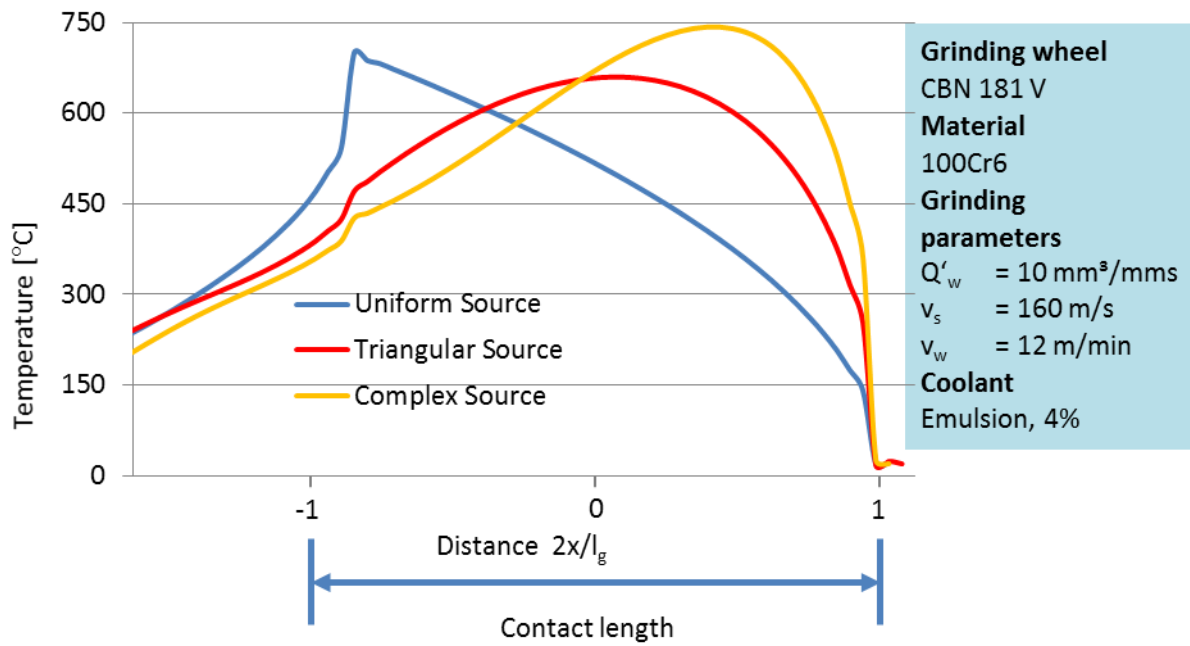


Figura 12: Evolución de la temperatura a lo largo de la superficie de la pieza para tres perfiles de temperatura

5.2 Análisis mecánico

En el caso de la simulación con cargas mecánicas sólo se consideran dos parámetros para validar la precisión de los resultados obtenidos: el tamaño de malla, se estudian cuatro posibilidades como puede verse en la **Figura 13** y el incremento de tiempo.

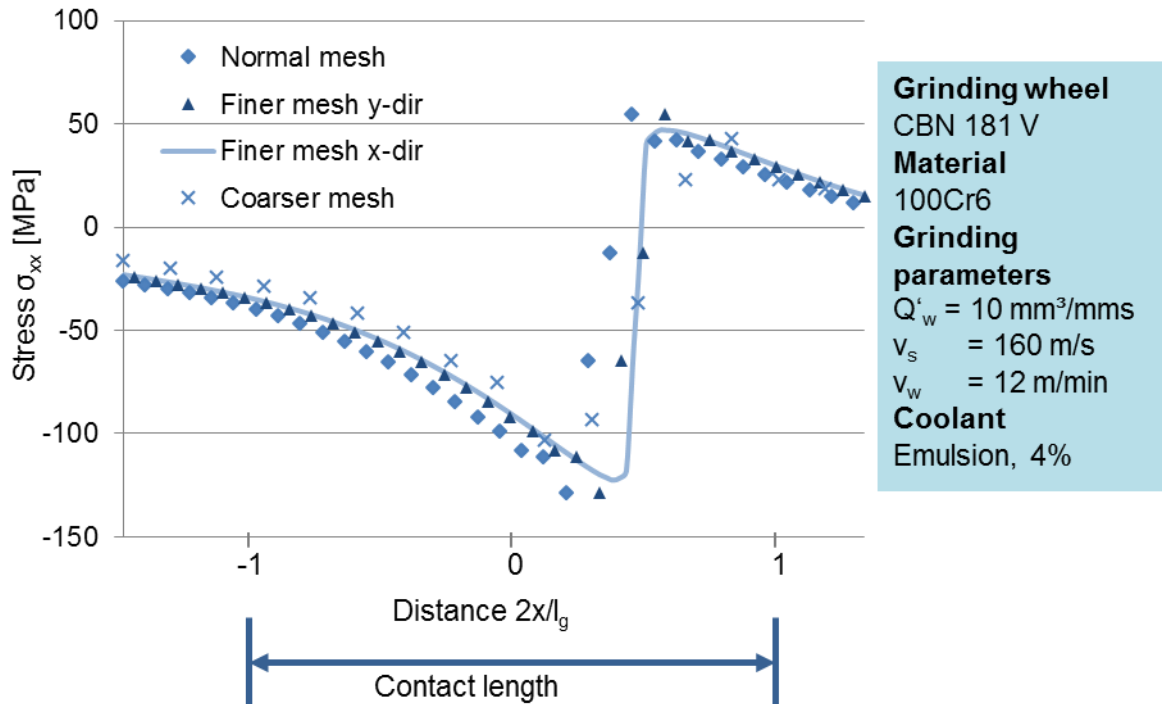


Figura 13: Resultados de la simulación mecánica para distintos tamaños de malla

Para los distintos tamaños de malla se distinguen unas variaciones de hasta $\Delta\sigma = 19.2 \text{ MPa}$ para las tensiones de compresión y $\Delta\sigma = 3.8 \text{ MPa}$ para las de tracción.

5.3 Análisis modelo mixto

Las simulaciones llevadas a cabo para el modelo mixto se han realizado para una velocidad de la mesa de trabajo de $v_w = 12 \text{ m/min}$ ya que para velocidades mayores como $v_w = 180 \text{ m/min}$ el software ABAQUS producía un mensaje de error debido a una distorsión excesiva de los elementos. Las posibles razones se discutirán más adelante.

Las tensiones producidas en la pieza mecanizada debido a la carga térmica se espera que sean de compresión como puede verse en la **Figura 14**.

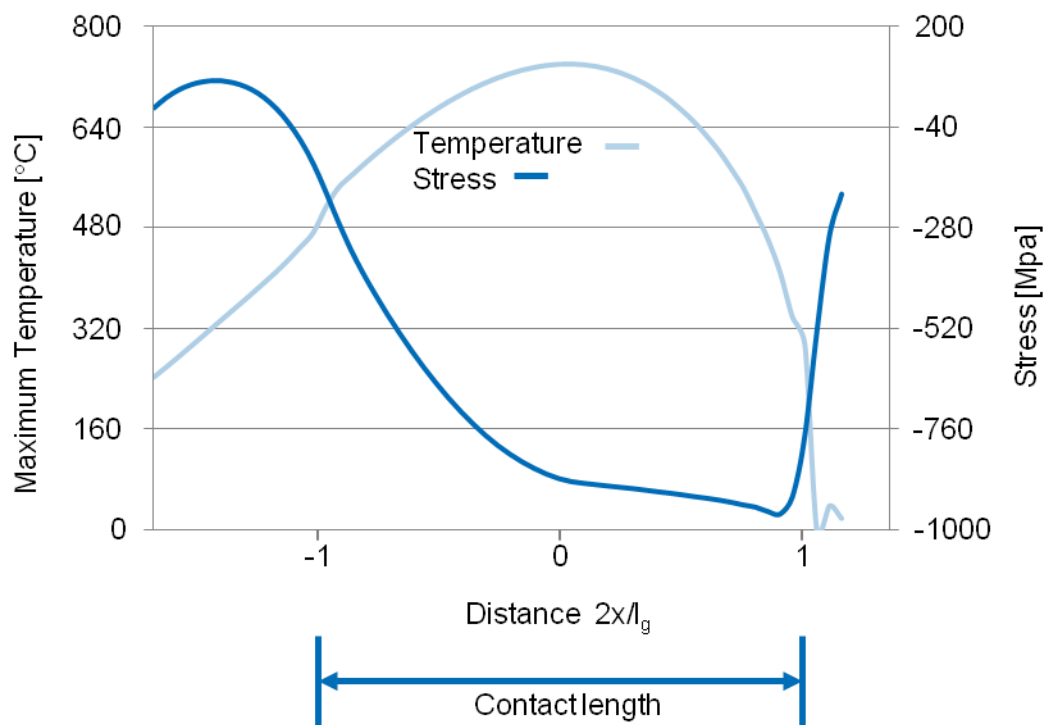


Figura 14: Tensiones en la pieza debido a la carga térmica

Mientras que el efecto de la carga mecánica es de tensiones de tracción en la pieza de trabajo que decrecen según aumenta la profundidad de la pieza. Como se dijo anteriormente, las capas por debajo de la capa superficial son las críticas en cuanto a daño térmico y cambio de fase, en la **Figura 15** puede verse que la carga mecánica tiene mayor influencia en estas capas. Pero no solo los efectos de la carga mecánica pueden ser perjudiciales, también se alcanzan altas temperaturas y la combinación de ambos efectos puede producir más fácilmente cambios de fase.

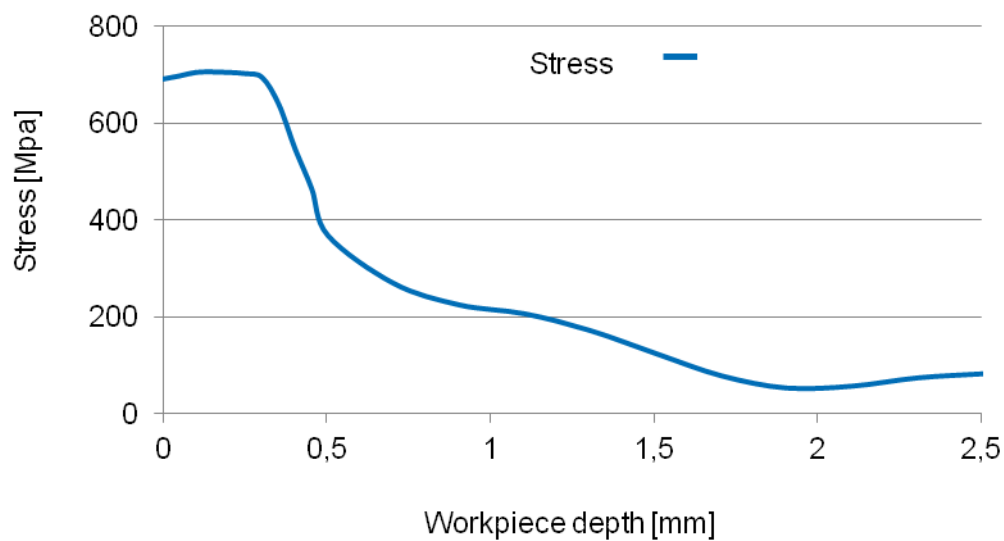


Figura 15: Tensiones en función de la profundidad

5.4 Conclusiones y trabajo futuro

En primer lugar, un modelo térmico y mecánico en 3D ha sido desarrollado con el software ABAQUS/Standard produciendo información valiosa del proceso de pulido. Esta información ha sido utilizada para validar datos experimentales y analíticos. Nueva información ha sido almacenada y estudiada para comprobar si concuerda con el proceso de pulido así como para comprobar las suposiciones realizadas al principio del estudio.

Después de haber ejecutado el modelo, dos subrutinas han sido implementadas satisfactoriamente. DLOAD y DFLUX han probado ser dos herramientas útiles debido a su flexibilidad para definir el comportamiento y propiedades del material.

Con los resultados de las simulaciones, los cuales muestran concordancia con los resultados mecánicos y térmicos de experimentos y estudios teóricos, puede establecerse que el pulido pendular y el pulido de alta velocidad son menos dañinos para la pieza. Las temperaturas alcanzadas en la superficie de la pieza a altas velocidades, $v_w = 180$ m/min, son mucho menores que aquellas a bajas velocidades, $v_w = 12$ m/min. Sin embargo, para el análisis mecánico han de validarse experimentalmente.

Aunque se ha implementado un modelo válido para propiedades del material dependientes y con diferentes parámetros de funcionamiento, todavía es necesario el predecir los posibles cambios de fase y por lo tanto condiciones críticas de pulido. Las nuevas investigaciones deberían centrarse en:

- Crear un modelo 3D que considere la eliminación de material que ocurre en el proceso. En los resultados obtenidos puede verse que a determinadas velocidades el comportamiento de la temperatura no es el esperado. La razón más probable es la elección de las condiciones de

contorno y dónde se producen las mediciones de la temperatura. Ver **Figura 16**.

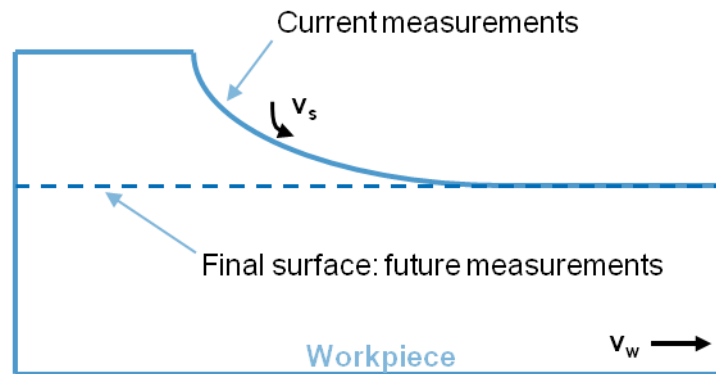


Figura 16: Actualización de las condiciones de contorno

- Hay que revisar atentamente las suposiciones realizadas. Por ejemplo el perfil de temperatura, que aunque se ha demostrado que el perfil empleado produce resultados validados experimentalmente convendría implementar modelos con perfiles más precisos para comprobar si los empleados en esta tesis tiene una buena relación precisión-tiempo de cálculo.
- Las propiedades del material son dependientes de la temperatura. Como puede verse en la **Figura 17** a altas temperaturas el límite de elasticidad se reduce significativamente. Esto puede producir deformación plástica y por lo tanto tensiones residuales. En el capítulo anterior se mencionaba que las simulaciones se habían realizado a bajas velocidades de la mesa de trabajo debido a altas distorsiones de los elementos. Se cree que a bajas temperaturas la influencia de la temperatura es mucho mayor que la de las cargas mecánicas debido a las altas temperaturas y que las fuerzas son aplicadas por una mayor cantidad de granos. Mientras que a altas velocidades la temperatura es menor pero el efecto de las cargas mecánicas es crítica debido al menor número de granos que participan.

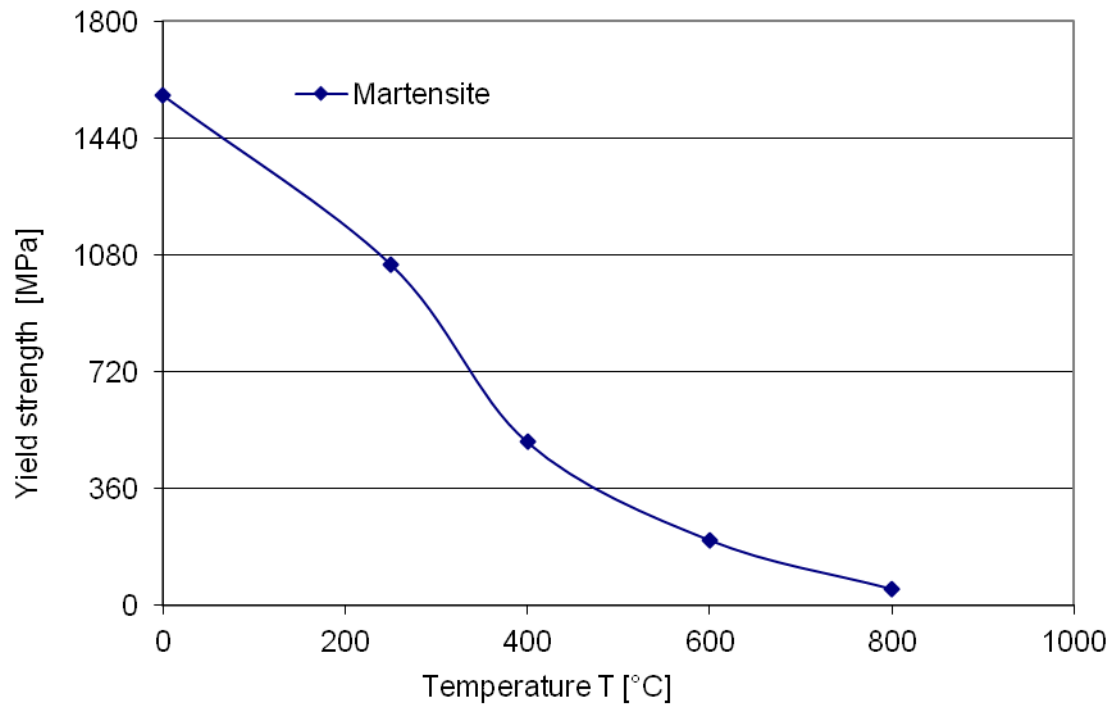


Figura 17: Límite elástico en función de la temperatura

- La subrutina DLOAD debería mejorarse con mediciones de fuerza más precisas.
- Optimización de la malla en cuanto tamaño y tipo para el análisis del cambio de fase, en especial utilizando elementos más pequeños para evitar problemas de distorsión demasiado elevada a altas velocidades.

6 Bibliografía

- [ANDE08] Anderson, D.; Warkentin, A.; Bauer, R.: Experimental validation of numerical thermal models for shallow and deep dry grinding. In: Journal of Materials Processing Technology, Vol.204, 2008, pp. 269–278
- [BABE13] Babel, R.; Koshy, P.; Weiss, M.: Acoustic emission spikes at workpiece edges in grinding: Origin and applications. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.64, 2013, pp.96-101
- [BIER97] Biermann, D.; Schneider, M.: Modelling and simulation of workpiece temperature in grinding by finite element analysis, Machining Science and Technology, Vol.1, No.2, 1997, pp.173–183

- [DOMA09] Doman, D. A.; Warkentin, A.; Bauer, R.: Finite element modelling approaches in grinding. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.49, No. 2, 2009, pp.109-112
- [DUSC10b] Duscha, M.; Klocke, F.; D'Entremont, A.; Linke, B.; Wegner, H.: Investigation of temperatures and residual stresses in speed stroke grinding via FEM simulation and practical tests. In: *Proceedings in Manufacturing Systems*, Vol.5, No.3, 2010, pp.143-148
- [HAMD04] Hamdi, H.; Zahouani, H.; Bergheau, J.-M.: Residual stresses computation in a grinding process. In *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.147, 2004, pp.277-285
- [JAEG42] Jaeger, C.: Moving sources of heat and temperature at sliding contact. In: *Proceedings of Royal Society, New South Wales*, Vol.76, 1942, pp. 203-224
- [JIN03] Jin, T.; Stephenson, D.J.: Investigation of the heat partitioning in high efficiency deep grinding. In: *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003. p.1130
- [JIN06] Jin, T.; Stephenson, D.J.: Analysis of grinding chip temperature and energy partitioning in high efficiency deep grinding. In: *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers: Part B, Journal of Engineering Manufacture*, Vol.220, 2006. pp.615-625
- [KIMP00] Kim, P.J.; Lee, D.G.; Choi, J.K.: Grinding characteristics of carbon fiber epoxy composite hollow shafts, *Journal of Composite Materials*, Vol.34, 2000. pp.2016-2035
- [KLOC05] Klocke, Fritz; König, Wilfried: *Fertigungsverfahren 2: Schleifen, Honen, Läppen* Springer Verlag 2005
- [KLOC09] Klocke, F.: *Manufacturing Processes 2, Grinding, Honing, Lapping*, Springer, Berlin Heidelberg, 2009
- [LIUW02] Liu, W.J.; Pei, Z.J.; Xin, X.J.: Finite element analysis for grinding and lapping of wire-sawn silicon wafers. In *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.129, 2002, pp.2-9
- [MAHD98] Mahdi, M.: A numerical investigation into the mechanisms of residual stresses induced by surface grinding, *Dissertation University of Sydney*, 1998
- [MAMA03] Mamalis, A. G.; Kundrák, J.; Manolakos, D.E.; Gyáni, K.; Markopoulos, A.: Thermal modelling of surface grinding using implicit finite element techniques. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.21, 2003, pp.929-934
- [MAOC08] Mao, C.; Zhou, Z.; Zhou, D.; Gu, D.: Analysis of the influence factors for the contact length between wheel and workpiece in surface grinding. In *Key Engineering Materials* Vol.359-360, 2008, pp.128-132
- [MARI04] Marinescu, I. D.; Rowe W. B.; Dimitrov B.; Inasaki I.: *Tribology of Abrasive Machining Processes*, William Andrew Publishing, New York, 2004, pp.93-106
- [MOUL01] Moulik, P.N.; Yang, H.Y.T.; Chandrasekar, S.: Simulation of thermal stresses due to grinding. In *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.43, 2001, pp.831-851
- [PAUL95] Paul, S.; Chattopadhyay, A.B.: A study of effects of cryo-cooling in grinding. In *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.35, 1995, pp.109-117
- [POMB12] Pombo, I.; Sánchez, J. A.; Ortega, N.; Marquínez, J. I.; Izquierdo, B.; Plaza, S.: Contact length estimation in grinding using thermocouple measurement and numerical simulation. In *International Journal of Advanced Manufacture Technologies*, 2012, pp.90-91
- [QIHS97] Qi, H. S.; Rowe, W. B.; Mills, B.: Contact length in grinding. Part 2: evaluation of contact models. In *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol.211 Part J, 1997, p.4

- [SHAH11] Shah, S. M. A.: Prediction of residual stresses due to grinding with phase transformation, Dissertation Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur de Lyon, 2011
- [WANG03] Wang, L.; et al.: Computer simulation of a workpiece temperature field during the grinding process. In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers — Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol.217, No.7, 2003, pp.953–959
- [WARN99] Warnecke, G.; Barth, C.: Optimization of the dynamic behaviour of grinding wheels for grinding of hard and brittle materials using the Finite Element Method. In Annals of the CIRP, Vol.48, No.1, 1999, p.261-264
- [WEBE99] Weber, T.: Simulation of grinding by means of the finite element analysis. In 3rd International Machining and Grinding Conference, Society of Manufacturing Engineers, 1999
- [YUXX99] Yu, X.X.; Lau, W.S.: A finite element analysis of residual stresses in stretch grinding. In Journal of Materials Processing Technology, Vol.94, 1999, pp.13–22
- [ZHAN95a] Mahdi, M.; Zhang, L. C.: The finite element thermal analysis of grinding process by ADINA. In Computers and Structures, Vol.56, No. 2-3, 1995, pp.313-320
- [ZHAN95b] Mahdi, M.; Zhang, L.: A numerical algorithm for the full coupling of mechanical deformation, thermal deformation, and phase transformation in surface grinding. In Computational Mechanics, Vol.26, 2000, pp.148-156
- [ZHAN95c] Zhang, L.; Mahdi, M.: Applied mechanics in grinding-IV: the mechanism of grinding induced phase transformation. In International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.35, 1995, pp.1397-1409